

電磁鋼板環状試料の磁気特性測定法についての検討

Measurement of Magnetic Properties of Ring-Shaped Electrical Steel Sheets

森 啓士郎, 渡邊 浩二, 柳瀬 俊次, 岡崎 靖雄, 栢 修一郎

岐阜大学工学部, 岐阜市柳戸 1-1 (〒501-1193)

K. Mori, K. Watanabe, S. Yanase, Y. Okazaki, and S. Hashi

Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

We examined a method for measuring the magnetic properties of ring-shaped electrical steel sheets. The magnetic properties measured in ring-shaped samples depend on the orientation of stacked sheets, in spite of non-oriented sheet samples. We also measured the two-dimensional magnetic properties of non-oriented samples. Magnetic properties that are dependent on the stacking orientation appear to differ due to magnetic flux passing between the sheets.

Key words: electrical steel sheet, ring-shaped sample, two-dimensional magnetic measurement, angular dependence of magnetic loss

1. はじめに

モータの鉄心材料に広く用いられている無方向性電磁鋼板の磁気特性を把握することは、モータの省エネ設計にあたって必要不可欠である。そのため、無方向性電磁鋼板の磁気特性評価のためにエプスタイン試験器¹⁾や単板磁気試験器 (SST)²⁾による特性測定が行なわれている。一方、実機中の電磁鋼板には回転磁束が生じていることから、電磁鋼板の二次元磁気特性³⁾⁻⁵⁾についても検討されている。これらの磁気特性測定に使用される試料形状は短冊形、円形、正方形や六角形などである。そこで、実機鉄心形状に近い環状試料の材料磁気特性と実機特性の対応を把握するために、環状試料の局所磁気特性と二次元磁気特性を比較するなどして、環状試料による磁気特性測定法について検討した。

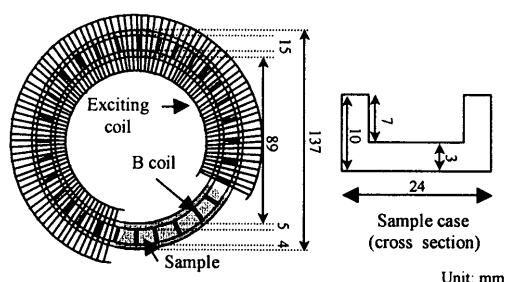


Fig. 1 Configuration of several coils and sample case.

2. 実験方法

2.1 環状試料の磁気特性測定法

環状試料の磁気特性測定に用いた各種巻線と試料ケースの概略を Fig.1 に示す。環状試料には、内径 102 mm, 外径 127 mm に打ち抜き加工された無方向性電磁鋼板 50A470 (新日鐵製) を 10 枚用いた。10 枚の試料を圧延方向を揃えて積層する平行積みか、18°ずつ徐々にずらして積層する 18°回し積みにし、試料全体に直接 0.26 mm φ の B コイルを巻いて、試料ケースに入れる。その後、そのケース全体を励磁コイルで巻く構成になっている⁶⁾。測定は周波数 50 Hz, 磁束正弦波 $B_m = 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7$ T にて行った。

環状試料の磁気特性測定系を Fig.2 に示す。F.S. (ファンクションシンセサイザ) からの電圧信号をパワーアンプで増幅して励磁コイルに電流を流す。パワーアンプのオフセット直流成分による偏磁の発生を防ぐために、AC カップリング (直流カット用コンデンサ) を使用して直流成分を除去している。励磁コイルに流れる電流を測定するために 0.5 Ω の標準抵抗を励磁コイルと直列に接続した。また、高磁束密度励磁時に励磁コイルに流れる電流が急激に増加することを軽減するために励磁コイルと直列に摺動抵抗を接続して調節できるようにした。試料の磁束密度 B の検出は試料に直接巻かれた B コイルの出力を、また、試料に印加されている磁界 H の検出は標準抵抗の両端電圧を A.R. (アナライジングレコーダ) により測定して行った。

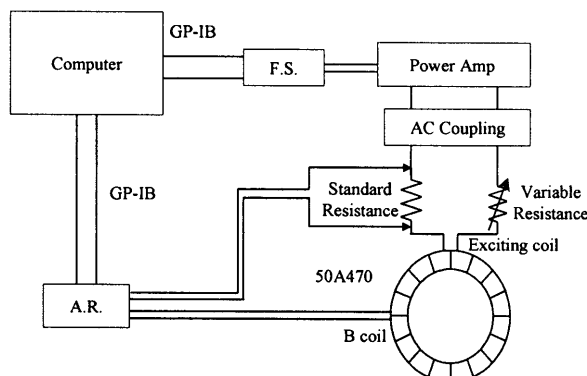


Fig. 2 Block diagram of measuring system for ring-shaped sample.

2.2 環状試料の局所磁気特性測定法

10 枚の試料から選んだ 2 枚の試料を用いて、圧延方向を揃えて積層した場合と、90°ずらして積層した場合について測定した。その際 Fig.3 のように 2 枚のうち 1 枚の試料に対して、平均的な磁束密度を測定するために、0.1 mm ϕ の B コイルを試料の半周に巻き、さらに試料励磁方向と圧延方向のなす角が 0, 45, 90°となる位置の局所磁気特性を測定するために、それぞれの位置に 0.1 mm ϕ の B コイルを巻いた。平均的な磁界は、励磁コイルに流れる電流から求めた。局所的な磁界および磁気特性は、サイズ 10×10×0.63 mm の H コイルを局所 B 検出コイル上に配置して測定した。

2.3 二次元磁気特性測定法

環状試料の局所的磁気特性と二次元磁気特性との比較を行なうため、二次元磁気特性をリング型二次元磁気特性測定装置⁷⁾を用いて測定した。ここで用いた試料は、環状試料と同じ材料 50A470 (新日鐵製) の 170 mm×170 mm の正方形試料である。圧延方向を 0°方向、それに垂直な方向を 90°として、0, 22.5, 30, 45, 60, 67.5, 90°方向の周波数 50 Hz, $B_m = 1.0$ T の交番磁束正弦波励磁下での測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 環状試料の磁気特性

10 枚の試料の積層方法による鉄損特性の違いを Fig.4

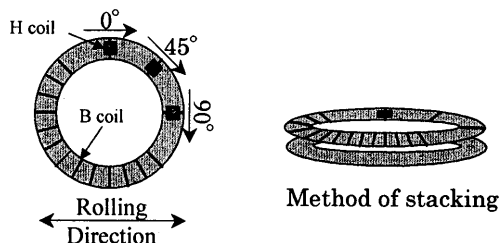


Fig. 3 Configuration of several coils for local magnetic properties.

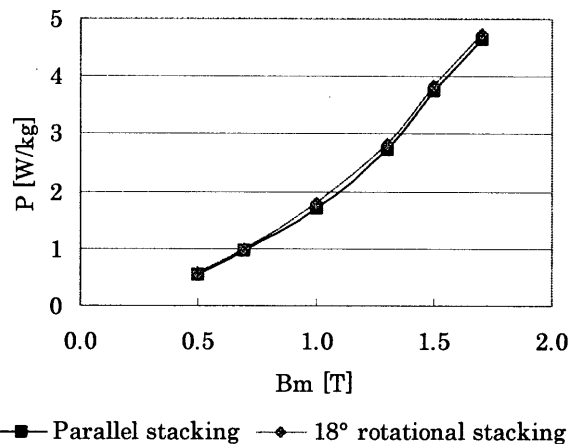


Fig. 4 Iron loss under parallel and rotational stacking of sheets ($f= 50$ Hz).

に示す。平行積みの結果を■で、18°回し積みの結果を◆で示してある。平行積みの鉄損値に比べ、回し積みの鉄損値の方が大きな値を示し、1.0 T 励磁下では、回し積みの損失の方が 5 %程度大きくなっている。ここで、試料 1 枚ずつの鉄損値のばらつきは 1%未満であることから、この鉄損値の違いは試料の積層方法によるものと考えられる。

Fig.5 に 1.0 T 励磁下における 2 種類の積層法による B-H ループを示す。平行積みの B-H ループと 18°回し積みの B-H ループとではループ形状が異なり、このループ形状の違いが損失の差となっている。

10 枚の試料における 1.0 T, 50 Hz および 90 Hz の鉄損測定値から、2 周波法で鉄損分離を行った 1.0 T, 50 Hz の分離結果を Table.1 に示す。平行積みと回し積みにおけるヒステリシス損と渦電流損の割合はほぼ等しく、回し積みにすることにより、ヒステリシス損失、渦電流損失ともに増加していることが分かる。

3.2 環状試料の局所磁気特性

平行積みと回し積みによる鉄損の違いについてより詳しく検討するために、2 枚の試料を平行積みと 90°回し積みにした場合の局所磁気特性を測定した。試料 10 枚を 18°回し積みにすると平行積みに比べ鉄損値が 5 %程度増加したのに対して、試料 2 枚を 90°回し積みにした

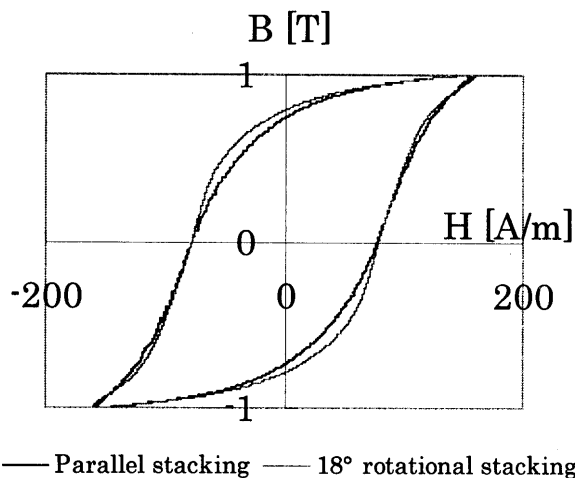


Fig. 5 B-H loops of 10-sheet sample ($f= 50$ Hz, $B_m = 1.0$ T).

Table 1 Separation of iron loss ($f= 50$ Hz, $B_m = 1.0$ T).

	Iron loss [W/kg]	Hysteresis loss [W/kg]	Eddy loss [W/kg]
Parallel stacking	1.701	1.262 (74.2%)	0.439 (25.8%)
18° rotational stacking	1.782	1.317 (73.9%)	0.465 (26.1%)

場合の鉄損値は、平行積みに比べ、2 %程度の増加となった。Fig.6 に示した試料 2 枚によるループ形状と Fig.5 の試料 10 枚によるループ形状を比べると試料 2 枚の場合でも鉄損の変化に相当するループ形状変化が見られる。なお 90° 回し積みにした場合でも、2 枚の試料間に 1 mm の間隔をもたせると、平行積みと同様な損失、ループ形状となり、2 枚の試料が密着、あるいはわずかな間隔をおいて存在する場合にのみ、平行積みと回し積りで違いが生じることを確認した。

試料 2 枚による局所磁気特性を Fig.7 に示す。試料 2 枚を平行積みした (a) の磁束密度波形には 0, 45, 90° 位置による違いはあまり見られず、磁束が試料中でほぼ均一に分布している。しかし、磁界波形は測定箇所により大きく異なり、振幅については 0° 位置で小さく、90° 位置で大きくなっている。これは、無方向性電磁鋼板で

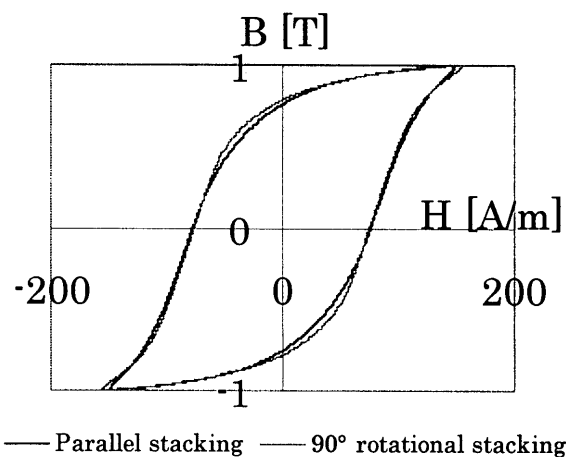


Fig. 6 B-H loops of 2-sheet sample
($f = 50$ Hz, $B_m = 1.0$ T).

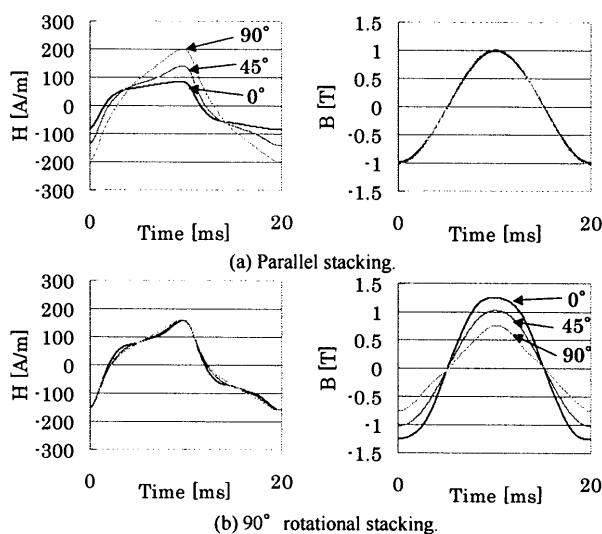


Fig. 7 Local magnetic properties of 2-sheet sample
($f = 50$ Hz, $B_m = 1.0$ T).

はあっても圧延方向が磁化容易方向になっているという試料の異方性があらわれているものである。これに対して、試料 2 枚を 90° 回し積みした (b) の特性は、逆に磁束密度波形が大きく異なり、磁界波形にはあまり違いが見られない。これは、試料を回し積みにすることにより、透磁率の高い部分に磁束が集中するように試料板間を磁束が行き来する渡り磁束が発生して試料 1 枚の中での磁束分布が不均一になること、またその際には、磁界強度の試料境界接線成分の連続性から磁界分布の方が均一になりやすいことを示している。

1.5 T における磁束密度、磁界の波形を Fig.8 に示す。90° 回し積みの 1.5 T の磁束密度波形の振幅には、1.0 T の場合ほどの変化が見られないが、これは、飽和磁束密度に近づき透磁率の局所的な差が小さくなるためで、磁束密度の波形の 1.0 T 付近では 1.0 T 励磁の場合の分布に似た傾向がみられる。このように 1.5 T の場合では、渡り磁束は磁束密度のピーク近傍ではなく、中間の磁束密度領域でおこっていることがわかる。

Fig.9 (a) に 0, (b) に 90° 位置での B-H ループ (1.0 T 励磁; Fig.7 の測定条件) を示す。0° 位置では回し積みの方の方が大きく、90° 位置では平行積みのループ

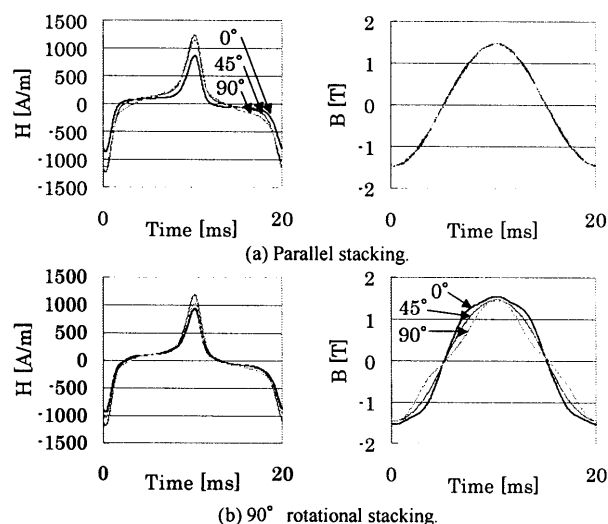


Fig. 8 Local magnetic properties of 2-sheet sample
($f = 50$ Hz, $B_m = 1.5$ T).

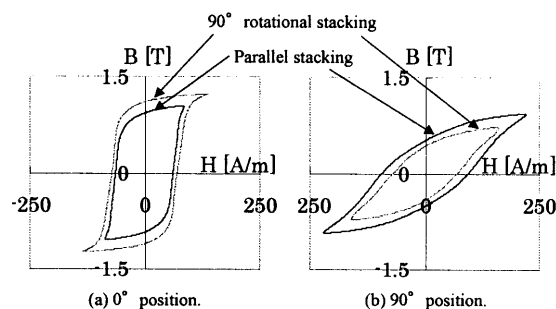


Fig. 9 B-H loops of 2-sheet sample at 0° and 90°
($f = 50$ Hz, $B_m = 1.0$ T).

の方が大きくなっている。

Fig.9 に示すループの面積を局所的鉄損として、二次元磁気特性測定による鉄損値と比較したものを Fig.10 に示す。二次元磁気特性を▲で、環状試料の局所的磁気特性の平行積みを■で、90°回し積みを◆で示してある。Fig.10 の結果では、平行積みの鉄損が二次元磁気特性の磁気損失と同じ傾向を示している。平行積みの鉄損の方が二次元磁気特性と異なるのは、環状試料の磁気特性測定時における磁束の流れと正方形試料による二次元磁気特性測定時における磁束の流れが異なることや、試料形状が異なるため試料切り出し時の応力の影響が異なることなどが原因と考えられる。回し積みの特性は、二次元磁気特性とは逆に 0°位置で大きく、90°位置で小さいという傾向を示している。この鉄損分布には、先に示した磁束密度の不均一分布が大きく影響している。

ヒステリシス損が B_m の 1 乗より大きな依存性を持つと考えれば、渡り磁束による磁束の不均一が生じると、 B_m の低い部分のヒステリシス損の減少に比べ、高い部分におけるヒステリシス損の増加の方が大きくなるため、試料全体としてのヒステリシス損が増加するものと考えられる。しかし、今回用いた無方向性電磁鋼板の鉄損には Fig.10 中■で示すような角度依存性があり、 B_m の大きくなる 0°位置では鉄損が小さく、 B_m の小さくなる 90°位置では鉄損が大きくなる。そのため、ヒステリシス損失についても同様の傾向があると考え、今回用いた

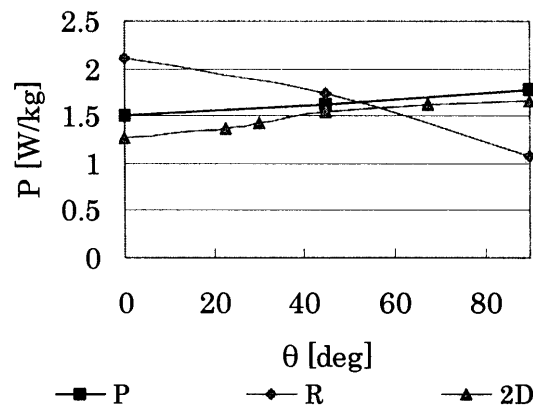


Fig. 10 Angular dependence of iron loss
($f=50$ Hz, $B_m=1.0$ T).

電磁鋼板では、その両者の増減による相殺により、回し積みのヒステリシス損失の増加は数%にとどまっているのではないかと考えられる。また、磁束が試料板間を渡ることによる試料面内渦電流損の増加、および不均一磁束分布による渦電流損の増加もおこっている。

4. まとめ

二次元磁気特性と比較するなど環状試料の磁気特性測定法について検討した。環状試料を平行積みにすると渡り磁束を生じないが、回し積みにすると渡り磁束の影響によって損失が大きくなる。したがって、モータ実機の特性和素材特性とを対応させるためには、実機の鉄心構成時の積層方法に対応して環状試料の磁気特性測定を行なうことが必要である。また、二次元磁気特性測定による試料の任意方向特性が把握できれば、渡り磁束なども含めた電磁界数値解析により特性値を推定することは可能とは思われるが、測定の難易度から考えれば、環状試料特性の測定値と実機特性との対応を明確にすることが重要である。ただし、実機の鉄心では磁束がすべて円周方向に通過しているわけではないため、実機の磁化状態に対応した測定法についても検討していく必要がある。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、試料を提供していただいた新日本製鐵（株）技術開発本部の溝上雅人氏に深謝する。

文献

- 1) JIS C2550 (2000)
- 2) JIS C2556 (1996)
- 3) A. Hasenzagl, H. Pfitzner, A. Saito and Y. Okazaki: *J. Phys. IV France*, 8, p.681 (1998)
- 4) M. Nakano, H. Nishimoto, K. Fujiwara and N. Takahashi: *IEEE Trans. Magn.* 35, 5, p.3965 (1999)
- 5) M.Enokizono, T.Todaka and S.Kanao: *J. Magn. Soc. Jpn*, 17, p. 559 (1993)
- 6) K. Watanabe, K. Mori, S. Yanase, Y. Okazaki, S. Hashi: *IEE Jpn Tech. Meeting on Magn*, MAG-03-94 (2003)
- 7) N. Ichijo, S. Yanase, S. Hashi and Y. Okazaki: *IEE Jpn Tech. Meeting on Magn*, MAG-02-187 (2002)

2003 年 10 月 24 日受理, 2004 年 1 月 15 日採録